

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА В ДЕФЕКТОСКОПИИ

А.А. Быков, О.Р. Кузичкин

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром

В статье представлены результаты исследования возможности применения сейсмоэлектрического эффекта в задачах контроля электропроводных изделий. Разработанные модели могут быть использованы в задачах неразрушающего контроля, что позволит повысить достоверность и оперативность получаемой информации о текущих изменениях контролируемых объектов в природно-технических системах.

Ключевые слова: сейсмоэлектрический метод, моделирование, дефектоскопия, алгоритм обработки данных.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с возрастающими требованиями к эксплуатационной защищенности объектов жилищно-коммунального хозяйства все чаще возникает необходимость раннего обнаружения предаварийных состояний. Особенно это актуально для крупных и протяженных объектов, у которых затруднен доступ ко всей поверхности. К таким объектам относятся подземные трубопроводы, строительные сооружения (несущие железобетонные конструкции, мосты, радио- и телевизионные башни и т.д.). В процессе эксплуатации данных объектов контроля вследствие различных причин происходят физический износ конструкций, снижение и потеря несущей способности сооружений, деформации как отдельных элементов, так и объекта в целом.

Для разработки мероприятий по восстановлению эксплуатационных качеств конструкций, необходимо проведение обследования с целью выявления причин преждевременного износа и понижения несущей способности. Особенно важно проведение обследований после разного рода техногенных и природных воздействий (пожары, наводнения, сезонные климатические воздействия, различные геологические процессы и т.п.), при реконструкции старых объектов, что часто связано с изменением действующих нагрузок, изменением конструктивных схем и необходимостью учета современных норм проектирования.

Разнообразие проявления дефектов в конструкциях и стадий их развития осложняет их изучение и анализ.

В последнее время в методах исследования в основном преобладают ультразвуковые и электрические методы контроля. Но, как недостаток, можно отметить необходимость обеспечить доступ ко всей поверхности контролируемого объекта, а при теневом ультразвуковом методе – одновременный двусторонний доступ. При зеркально-теневом методе недостаточно высока точность определения координат дефекта. Также за-

труднен ультразвуковой контроль (УЗК) крупнозернистых материалов (чугуна, меди, аустенитных сталей) и контроль изделий толщиной от 4 до 10 мм.

Таким образом, для контроля вышеупомянутых объектов наиболее оптимальным является применение электрических методов. Одним из возможных подходов повышения эффективности контроля является совместное воздействие упругих и электрических полей для получения дополнительной информации о состоянии объекта контроля [1, 2].

Целью работы является исследование возможности применения сейсмоэлектрического метода в задачах контроля электропроводных объектов и обоснование основных требований к регистрирующим сигналам.

ПРОДОЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В КОНТРОЛИРУЕМОЙ СРЕДЕ

Предположим, что некоторый протяженный электропроводный контролируемый объект можно представить в виде совокупности изотропных элементов среды, на который воздействует продольной моды плоской деформационной волны S_n . Пусть элемент имеет прямоугольную форму размером $l_x \times l_y \times l_z$ и смещение происходит только по орту \vec{x} на величину Δx [3].

Под действием силы сжатия (растяжения) S_n происходит смещение (упругая деформация) элементов среды [4]:

$$l'_x = l_x + \Delta x = l_x \left(1 + \frac{\Delta x}{l_x} \right) = l_x (1 + u_x), \quad (1)$$

где u_x – элемент тензора деформации по орту \vec{x} .

Можно представить каждый элемент среды в виде несовершенного диэлектрика (рис. 1) [5].

Комплексная форма записи модели характеризует наличие токов смещения, и соответственно необходимости учета мнимой составляющей сопротивления среды при сейсмоэлектрическом контроле [3]:

$$\dot{Z}_x = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x} \quad (2)$$

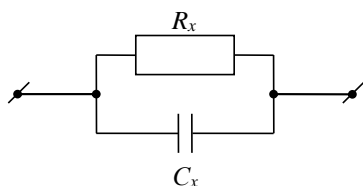


Рис. 1. Модель элемента среды в виде несовершенного диэлектрика

В уравнении (2) элементы R_x и C_x описывают электрические и геометрические параметры элемента среды по орту \vec{x} :

$$R_x = \rho \frac{l_x}{l_y l_z} = \rho \frac{l_x}{S_{yz}}, \quad C_x = \varepsilon \frac{S_{yz}}{l_x}. \quad (3)$$

При деформационном воздействии сил сжатия (растяжения) продольной волны, электрические параметры элемента среды (3) примут следующий вид:

$$R'_x = \rho \frac{l_x(1+u_x)}{S_{yz}}, \quad C'_x = \varepsilon \frac{S_{yz}}{l_x(1+u_x)},$$

$$R'_x \cdot C'_x = \rho \varepsilon \frac{l_x(1+u_x)}{S_{yz}} \cdot \frac{S_{yz}}{l_x(1+u_x)} = \rho \varepsilon \quad (4)$$

Исходя из (4) для уравнения (2) окончательно получим:

$$Z'_x = \frac{1}{1+j\omega\rho\varepsilon} \rho \frac{l_x(1+u_x)}{S_{yz}} = \frac{\rho l_x}{S_{yz}(1+j\omega\rho\varepsilon)} \cdot (1+u_x). \quad (5)$$

Как видно из выражения (5) комплексное сопротивление элемента среды под действием продольного упругого деформационного воздействия изменяется по модулю пропорционально тензору смещения.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведем моделирование воздействия упругой волны на металлический стержень длиной 3 м и диаметром 0,01 м. Стержень в середине имеет дефект – уменьшение диаметра стержня до 0,005 м (рис. 2).

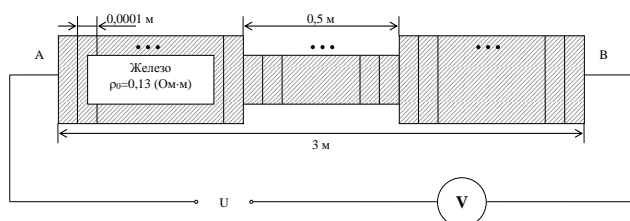


Рис. 2. Модель металлического стержня с дефектом

Условно стержень разбиваем на отдельные ячейки. Длина каждой ячейки – 0,1 мм. Длина каждой ячейки изменяется на 0,05 мм, то есть на 50 %. Удельное сопротивление железа – 0,13 Ом/м. Скорость звука в железе – 5000 м/с. Количество ячеек – 30000.

Длина текущей ячейки x изменяется в соответствии с выражением

$$l_{яч.}(x) = l_0 + (A \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x)).$$

Общее сопротивление стержня равно суммарному сопротивлению ячеек

$$R_{общ} = \sum_{x=1}^K R(x),$$

где x – номер текущей ячейки, K – общее количество ячеек.

Сопротивление каждой ячейки $R(x)$ определяется выражением $R(x) = \frac{\rho \cdot l}{S}$.

На стержень осуществлялось воздействие упругой волны и исследовалось изменение сопротивления стержня во время прохождения упругой волны по стержню. Значения сопротивления фиксировались с частотой 100 кГц и 1 мГц. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

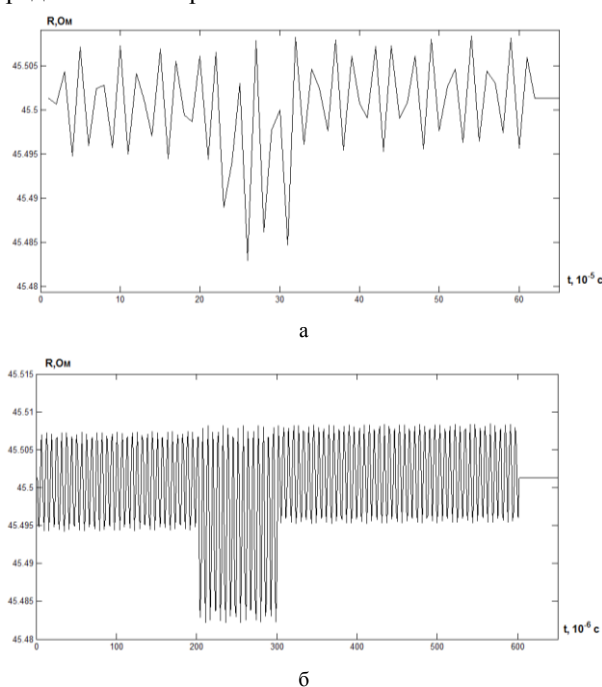


Рис. 3. Изменение сопротивления металлического стержня во время прохождения упругой волны при частоте регистрации: а) 100 кГц, б) 1 мГц

На представленном рисунке видно изменение сопротивления во времени при прохождении упругой волны по металлическому стержню. Также по графику можно оценить расположение дефекта, зная материал стержня и скорость распространения упругой волны по стержню. Как видно, локализовать дефект возможно с большей точностью при повышении частоты регистрации F_0 изменения электрических характеристик. Чем больше скорость упругой волны в материале и чем выше частота F_0 , тем меньший дефект возможно обнаружить:

$$F_0 > \frac{V_g}{l_0},$$

где V_g – скорость упругой волны в материале, l_0 – продольные размеры дефекта.

Аналогичным образом было проведено моделирование обнаружения дефектов сейсмоэлектрическим методом в металлических трубах (рис. 4). Моделировалась стальная водопроводная труба длиной 10 м. Внешний диаметр – 0,4 м, толщина стенки – 0,0012 м. Удельное сопротивление стали – 0,14 Ом/м. Скорость звука в стали – 5100 м/с. Количество изотропных элементов среды – 100000.

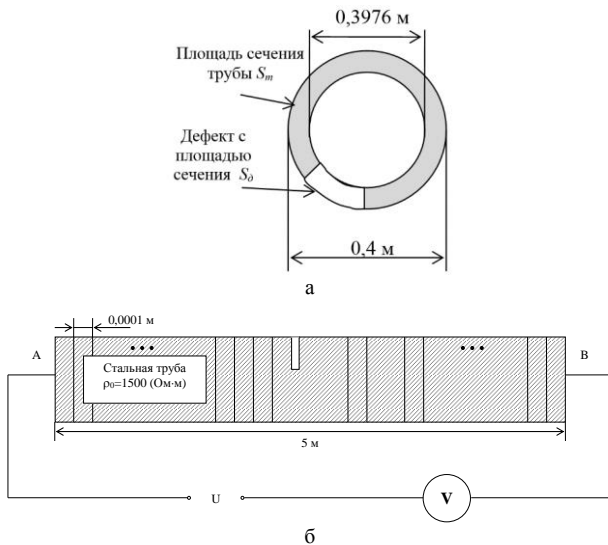


Рис. 4. Представление при моделировании стальной трубы с дефектом

При моделировании определялось относительное отклонение сопротивления контролируемого объекта в соответствии с выражением:

$$\varepsilon = \frac{R_B - R_A}{R_A} \cdot 100\%$$

Результаты моделирования представлены на рис. 5.

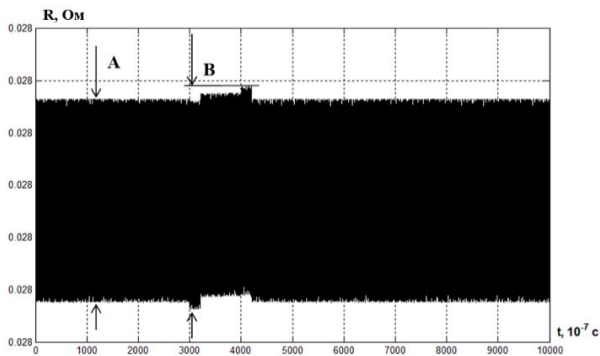


Рис. 5. Изменение сопротивления стальной трубы во время прохождения упругой волны

По результатам моделирования построен график зависимости относительной погрешности ε от площади дефекта для различной частоты упругой волны (рис. 6).

Таким образом, результаты моделирования показали, что сейсмоэлектрические методы могут быть применимы для контроля протяженных электропроводных объектов, таких как стальные трубы, рельсы, железобетонные перекрытия и т.п. Причем важное значение

имеет то, какие характеристики имеет упругая волна, воздействующая на контролируемый объект. Физически это означает, что сейсмическое воздействие как бы «подсвечивает» изучаемую среду. В контролируемые параметры добавляется дополнительная информация о структуре среды. Следовательно, структурные изменения в контролируемой среде могут быть обнаружены сейсмоэлектрическими методами ранее, чем возникнет необратимое разрушение объекта.

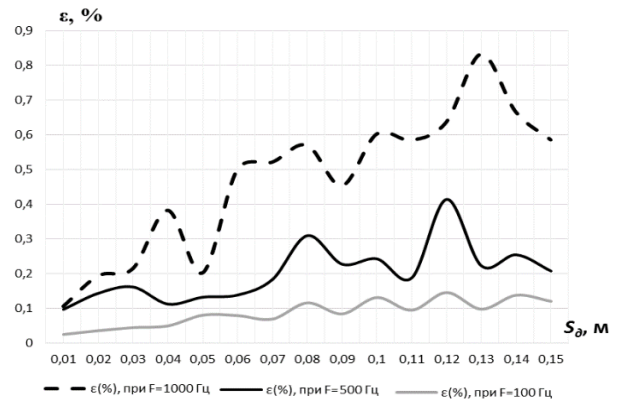


Рис. 6. Зависимость погрешности ε обнаружения дефекта от площади S_d дефекта

Использование комплекса сейсмоакустических, электрических и сейсмоэлектрических методов позволит повысить надежность прогнозных оценок и обеспечить выделение предкризисных ситуаций, и, соответственно, снизить уровень риска возникновения техногенных аварий и катастроф.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 13-05-97506 p_центр_a).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Быков А.А., Кузичкин О.Р. Геодинамический контроль раздела двух сред на основе сейсмоэлектрического эффекта. Южно-Сибирский научный вестник. – 2013. – № 2. – С. 61–63. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2013/2/14_61-63.pdf
2. Bykov A.A., Kuzichkin O.R. Application Seismoelectric Method for Inspection Electrically Conducting Media. Applied Mechanics and Materials Vols. 490–491. Trans Tech Publications, Switzerland. – 2014.
3. Быков А.А., Кузичкин О.Р. Применение сейсмоэлектрического метода при геодинамическом контроле в природно-технических системах. Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2013. – №2(16). – С. 22–28.
4. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука. 1968.
5. Быков А.А., Кузичкин О.Р. Комплексирование сейсмических и геоэлектрических методов при геодинамическом контроле. Методы и устройства передачи и обработки информации. 2012. – №1. – С. 45–48.

Кузичкин Олег Рудольфович – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и контроль в технических системах» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», тел. (94234)77236, e-mail: electron@mivlgu.ru.

Быков Артём Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», тел. (94234)77127, e-mail: bykov_a_a@list.ru.